ON LEVITATION OF BODIES IN FORCE FIELDS

Yu. G. MARTYNENKO

The results of the investigation of theory and technique of levitation (noncontact suspension) of rigid bodies in electric and magnetic fields for different types of noncontact suspensions are reviewed.

Обсуждаются вопросы теории и техники левитации (неконтактного подвешивания) твердых тел в электрических и магнитных полях при использовании различных типов неконтактных подвесов, существующих и разрабатываемых в настоящее время.

О ПРОБЛЕМАХ ЛЕВИТАЦИИ ТЕЛ В СИЛОВЫХ ПОЛЯХ

Ю. Г. МАРТЫНЕНКО

Московский энергетический институт (технический университет)

ВВЕДЕНИЕ

Состояние, при котором твердое тело “парит” в силовом поле подвеса без какого-либо механического контакта с окружающими телами, называется левитацией.

Происхождение этого термина, по-видимому, можно отнести к 1503 году, когда молодой купец Людовико ди Вартема отправился из Венеции с караваном в Мекку. Приняв ислам, он посещает город Медина, где, по его словам, находился Мавзолей с гробом пророка Мухаммеда (Магомета). Впоследствии, возвратившись в Европу, в своих очерках о путешествии по Аравии он расскажет о чуде: о том, что гроб Магомета парит в подземелье Мавзолея в Медине, неподвластный силам земного притяжения. Однако ни один очевидец подтвердить эту легенду не может: законы ислама гласят, что всякому, кто осмелится спуститься в погребальный склеп, как только он выйдет оттуда, отрубят голову.

В этой легенде была впервые[1] сформулирована задача о левитации — задача о свободном парении твердых тел в гравитационном поле Земли.

Великая тайна левитации в XX веке перестала быть большим секретом. Магнитный подвес ферритовых тел был реализован в тридцатых годах нашего столетия, а в 1945 году московский ученый В.К. Аркадьев создал неконтактный подвес, используя явление сверхпроводимости. Он заставил “левитировать” небольшой постоянный магнит над сверхпроводящим свинцовым диском (фотография этого эксперимента получила известность под названием “гроб Магомета”).

В наши дни неконтактный подвес — это уже не экзотика, а красивая инженерная задача, решенная во многих технических устройствах. Трудно даже представить себе те грандиозные преобразования, которые произойдут при широком внедрении левитации в технике.

Прежде всего неконтактный подвес радикально решает проблему трения и позволяет создавать “вечные” подшипники, которые не будут претерпевать износа во все время эксплуатации.

[1] В романе “Фараон” Болеслав Прус считал, что еще во времена царствования в Древнем Египте Рамзеса XII уже была известна тайна левитации.

Применение левитации открывает новую эру в развитии транспортной техники, позволяя создавать принципиально новый высокоскоростной транспорт – поезда на магнитной подвеске (магнитопланы).

Накопители энергии для высокоэффективных двигателей, суперцентрифуги, в которых создаются поля центробежных сил во многие десятки миллионов *g*, вакуумные насосы, сверхточные навигационные приборы: гироскопы, градиентометры, гирокомпасы – создание всех этих приборов и устройств было бы невозможно без использования достижений технологии левитации.

Целью данной статьи[1] является обсуждение тех препятствий, которые пришлось преодолеть при решении проблемы, многие столетия волновавшей умы ученых и философов, – задачи преодоления гравитации, причем основное внимание обращается на ключевые моменты на этом трудном и порой драматическом пути.

ТЕОРЕМЫ ИРНШОУ, ЛАГРАНЖА–ДИРИХЛЕ И УСТОЙЧИВОСТЬ ТЕЛА В НЕКОНТАКТНОМ ПОДВЕСЕ

Известные в настоящее время неконтактные подвесы можно разделить на три категории: электростатические, электромагнитные и криогенные. Эти типы подвесов как бы определяют три магистральных направления, по которым наука и техника штурмуют проблему левитации. Каждый из перечисленных подвесов имеет свои преимущества и недостатки, свою область применения.

Начнем с электростатического подвеса. Здесь одно из главных препятствий, возникающих перед разработчиками, заключается в природе электростатического поля, которая запрещает существование устойчивого равновесия электрических зарядов под действием одних только электрических сил. Этот факт носит в физике название теоремы Ирншоу, которая утверждает, что нельзя создать электрическое поле, в котором электрические заряды находятся в устойчивом равновесии и, следовательно, любые положения равновесия зарядов являются неустойчивыми[2]. Физический смысл теоремы Ирншоу становится более ясным, если вспомнить, что разноименные заряды притягиваются со все возрастающей силой вплоть до взаимной нейтрализации или уничтожения, одноименные же отталкиваются вплоть до удаления в бесконечность.



Аналогичная ситуация имеет место и в гравитационном поле, где материальные тела притягиваются по закону всемирного тяготения. Устойчивость Солнечной системы обеспечивается лишь вечным движением планет.

Здесь следует оговориться, что в 1839 году, когда английский физик и математик Ирншоу (S. Earnshaw) выступал с докладом "О природе молекулярных сил, определяющих физическое строение светоносного эфира", его не интересовала проблема левитации. Он пытался найти природу сил, которые делают материю устойчивой. Оказалось, что для сил, убывающих обратно квадрату расстояния между взаимодействующими точками, система не может находиться в устойчивом положении равновесия. Теорема Ирншоу сыграла большую роль в развитии теории атома, так как именно из этой теоремы следует, что атом не может быть "построен" из неподвижных зарядов, связанных между собой только электрическими силами, и должен представлять собой не статическую, а динамическую систему.

Максвелл включил результат Ирншоу в свой курс электродинамики, и в настоящее время после многочисленных "переписываний" из курса в курс разные авторы стали называть "теоремой Ирншоу" весьма разные утверждения.

[1] Рисунки к статье выполнены профессором МГУ И.В. Новожиловым.

[2] Неустойчивые положения равновесия никогда не могут быть практически реализованы. В этом читатель легко может убедиться, если попытается увидеть карандаш, стоящий вертикально на своем острие на гладкой поверхности стола.

Справедливости ради следует заметить, что вопрос об устойчивости тела в электромагнитном поле весьма тонкий и требует большой аккуратности. В теории устойчивости строго доказана теорема Лагранжа–Дирихле, которая гласит: *Если потенциальная энергия материальной точки* $\Pi = \Pi(r)$ *в окрестности положения равновесия* $r = r_0$ *имеет строгий локальный минимум, то это положение равновесия устойчиво.* Для потенциала Пенлеве–Уинтера $\Pi(r) = \cos(1/r)\exp(-1/r^2)$, $\Pi(0) = 0$ положение равновесия $r = 0$ устойчиво, хотя точка $r = 0$ не является, конечно, локальным минимумом потенциальной энергии $\Pi(r)$. Поэтому теорема Лагранжа не является необходимым условием устойчивости. Однако даже в очень солидных курсах физики маститых авторов при доказательстве теоремы Ирншоу приводится, вообще говоря, неверное утверждение: в данной точке потенциальная энергия не имеет минимума, поэтому положение равновесия неустойчиво.

В 1892 году выдающийся русский ученый А.М. Ляпунов поставил задачу об обращении теоремы Лагранжа для случая, когда коэффициенты квадратичной формы кинетической энергии и потенциальная энергия являются аналитическими функциями обобщенных координат в окрестности положения равновесия. Эта задача решена пока лишь в частных случаях [1, с. 287].

В таких условиях естественно напрашивается пессимистический вывод о безнадежности попыток использования электростатического поля для решения проблем левитации. Однако было найдено несколько выходов из казалось бы тупиковой ситуации.

Представим, что на оси z прямоугольной декартовой системы координат на одинаковом единичном расстоянии от начала координат жестко закреплены два одинаковых положительных заряда (рис. 1*а*).

Для одноименного подвижного заряда начало координат оказывается положением равновесия, так как кулоновы силы отталкивания от неподвижных зарядов будут уравновешены. При смещении подвижного заряда вдоль оси z, например вверх, сила отталкивания от верхнего заряда будет больше, чем от нижнего и, следовательно, результирующая

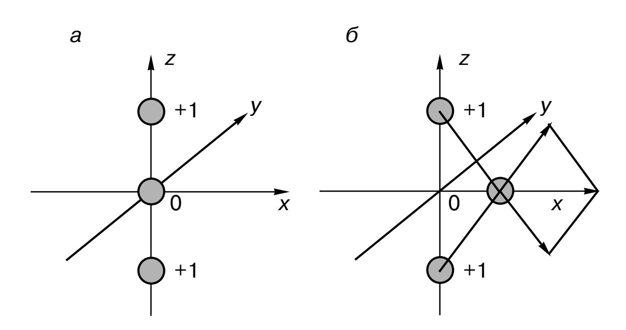


Рис. 1.

сил электрического поля будет стремиться заставить подвижный заряд вернуться в положение равновесия. Однако если подвижный заряд сместится в плоскости xy, то возникнет составляющая силы, отталкивающая заряд от оси z (рис.1*б*). При малых смещениях заряда от положения равновесия выражение для потенциальной энергии имеет вид

$$\Pi(x, y, z) = -(x^2 + y^2)/2 + z^2. \qquad (1)$$

Из формулы (1) можно сделать вывод, что в направлении z жесткость рассматриваемого подвеса подвижного заряда положительна, в направлениях x, y – отрицательна. Такие системы называются системами с четной степенью неустойчивости [2], причем они могут быть стабилизированы так называемыми "гироскопическими" силами. (Гироскопическими являются силы, величина которых пропорциональна скорости точки и которые направлены ортогонально вектору скорости.) Поэтому создадим дополнительное постоянное магнитное поле, вектор напряженности **H** которого направлен вдоль оси z. При этом на подвижный заряд будет дополнительно действовать сила Лоренца

$$\mathbf{F} = e[\mathbf{v}, \mathbf{H}], \qquad (2)$$

где e – величина точечного подвижного заряда, $\mathbf{v}$ – его скорость.

Линеаризованные уравнения движения подвижного заряда в электростатическом поле с потенциальной энергией (1) с учетом лоренцевой силы (2) после приведения к безразмерному виду примут форму

$$x'' = x + 2\alpha y',$$
$$y'' = -2\alpha x' + y, \qquad (3)$$
$$z'' = -2z.$$

Здесь штрихом обозначено дифференцирование по безразмерному времени, безразмерный параметр α пропорционален напряженности магнитного поля **H**, а масса точки и ее заряд для простоты выбраны равными единице. При $\alpha > 1$, то есть при достаточно большой напряженности магнитного поля, особая точка линейных дифференциальных уравнений (3) $x = y = z = 0$ будет устойчива по Ляпунову, то есть положение точки в указанном выше статическом электромагнитном поле устойчиво. Этот факт объясняется возможностью стабилизации неустойчивой системы с четной степенью неустойчивости гироскопическими силами (аналогичная ситуация имеет место, например, для волчка, вращающегося на гладкой горизонтальной плоскости: волчок падает при небольших угловых скоростях закрутки и начинает устойчиво вращаться вблизи вертикали, если его угловая скорость превышает некоторое критическое значение).

Подводя итоги изложенного, делаем заключение о том, что использование описанной выше комбинации постоянного магнитного поля с

электростатическим полем двух точечных зарядов может обеспечить устойчивость точечного заряда в постоянном электромагнитном поле.

Другой способ стабилизации тела в электростатическом поле основан на идеях автоматического регулирования. Представим, что мы можем с помощью специальных датчиков измерять местоположение тела вблизи некоторого неустойчивого положения равновесия. Когда датчик "увидит" или "почувствует", что твердое тело в электростатическом поле начинает удаляться от желаемого положения равновесия, он подаст сигнал в специальное устройство, которое изменит электрическое поле так, чтобы заставить тело вернуться в исходное положение.

Таким образом, использование идеи обратной связи позволяет решить проблему собственной неустойчивости электростатического подвеса. (После сказанного становится ясно, что сам термин "электростатический подвес" не совсем корректен: поле в подвесе не является, строго говоря, статическим, а меняется в зависимости от положения левитирующего тела. Однако скорости движения тела настолько малы по сравнению со скоростью распространения электромагнитного поля, что в каждый момент времени с большой степенью точности поле в подвесе можно рассматривать как электростатическое.)

Ясно, что любой отказ в системе автоматического регулирования электростатического подвеса (выход из строя датчика смещения, сбой в системе питания и т.п.) приведет к падению тела, то есть электростатический подвес оказывается довольно капризным устройством.

К сожалению, это не единственная проблема, которую приходится решать конструкторам электростатического подвеса. Существует проблема пробоя электрического поля, который устанавливает предел напряженности электрического поля, а следовательно, и максимальную подъемную силу, которую можно создать в данном подвесе, если мы, конечно, не хотим испепелить взвешенное тело молниями. Для увеличения веса левитирующего тела приходится очень тщательно очищать и обрабатывать его поверхность, потому что эксперименты по электрическому пробою показали, что напряженность электрического поля на шероховатой поверхности возрастает в 10 – 100 раз по сравнению с идеально гладкой поверхностью.

Кроме того, для увеличения электрической прочности зазора в электростатическом подвесе приходится удалять воздух из области, в которой левитирует тело. Вакуумирование системы существенно удорожает электростатический подвес, но вместе с тем практически полностью ликвидирует трение. В настоящее время созданы электростатические подвесы, у которых постоянная времени выбега, то есть времени, в течение которого тело уменьшает свою скорость в два – три раза, измеряется сотнями лет. Шар, однажды раскрученный в электростатическом подвесе, может практически вечно вращаться по инерции.

Масса тел, которые успешно подвешиваются в вакуумированных электростатических подвесах, обычно не превышает сотни грамм. Для подвеса больших тел, масса которых измеряется тоннами, применяют магнитные подвесы. Такие подвесы удерживают модели самолетов в аэродинамических трубах, валы мощных турбин и т.п.

Магнитные подвесы, в свою очередь, можно разделить на электродинамические и электромагнитные. Электродинамические подвесы основаны на известном явлении электромагнитной индукции. Если тело, содержащее контур с переменным током, перемещать над проводящей полосой, то по закону индукции в полосе появятся вихревые токи со своим собственным электромагнитным полем. Это поле, взаимодействуя с первичным контуром, создает подъемную силу, направленную вверх, и тормозящую силу, препятствующую движению. С ростом скорости контура растет и подъемная сила, которая является силой отталкивания, а тормозящая сила возрастает и, достигнув максимума на некоторой критической скорости, начинает убывать как квадратный корень из скорости левитирующего тела.

Электродинамический подвес может обеспечить взвешивание тела только после достижения телом некоторой пороговой скорости.

Электромагнитный подвес основан на свойстве магнита или электромагнита притягиваться к железному (ферррომагнитному) сердечнику. Чтобы парировать неустойчивость электромагнитного подвеса, также необходимо динамическое регулирование магнитным полем в зависимости от зазора между



левитирующим телом и магнитами системы подвеса. В электромагнитных подвесах используются как пассивные системы регулирования, основанные на резонансных свойствах специально настроенных колебательных контуров, так и активные системы автоматического управления, которые могут управляться ЭВМ. При зазорах в 10 – 15 мм затраты мощности на подвешивание составляют лишь 1 – 3 кВт на 1 т веса левитирующего тела. Недостатком магнитных подвесов являются неизбежные потери из-за вихревых токов, возникающих при движении твердого тела в магнитном поле. Поэтому, в отличие от электростатического подвеса, для поддержания вращения тел в магнитном подвесе надо постоянно расходовать энергию.

Здесь исключение составляют магнитные подвесы диамагнитных тел (диамагнетик – это тело, магнитная проницаемость которого $\mu < 1$). Примером реализации диамагнитного подвеса может служить система для прецизионного измерителя моментов сил в вакууме и электрометр для поиска свободных кварков [3]. Поскольку диамагнитные свойства таких материалов, как висмут и графит, которые обычно использовались для подвешивания, слабы, то до недавнего времени удавалось вывесить лишь небольшие массы порядка нескольких десятков миллиграммов. Появление новых материалов для постоянных магнитов и веществ с лучшими магнитными свойствами коренным образом меняет ситуацию. Поиски теплозащитных покрытий для космических кораблей привели к разработке промышленного метода получения пиролитического графита, магнитная восприимчивость которого в несколько раз больше, чем у обычного поликристаллического графита. Так, при помощи самарий-кобальтовых магнитов в Пермском университете в 1978 году удалось довести удерживаемый вес до 26,7 г. Это на несколько порядков больше, чем было ранее. Наряду с высокой эффективностью следует отметить простоту конструкции такого подвеса, когда подвешиваемый магнит располагается между пластинами из пиролитического графита и его вес компенсируется дополнительным неподвижным постоянным магнитом. Неконтактный подвес тел без затрат энергии значительно расширяет возможности и делает весьма перспективным применение диамагнитного подвеса.

Среди магнитных подвесов особо важное место занимают так называемые криогенные подвесы, в которых используются сверхпроводники. Сверхпроводники выталкиваются из магнитного поля, и их наличие в составе неконтактного подвеса позволяет создать такую конфигурацию магнитного поля, при которой твердое тело находится в состоянии устойчивого равновесия или, как говорят в таких случаях, твердое тело находится в "потенциальной яме"[1]. Отсутствие системы автоматического регулирования делает криогенный подвес более надежным, чем электростатический или электромагнитный.

В криогенном подвесе нельзя создавать очень большие магнитные поля, потому что существует предельное значение напряженности магнитного поля, при котором сверхпроводник теряет свои сверхпроводящие свойства, что естественно приведет к падению тела. Поэтому в криогенном подвесе, так же как и в электростатическом, существует ограничение на вес левитирующего тела. Тем не менее подъемная сила в криогенном подвесе оказывается существенно больше, чем в электростатическом. Так, например, известна конструкция криогенного подвеса пятитонной гравитационной антенны, предназначенной для приема гравитационных волн.

Трудность, возникающая при создании криогенного подвеса, связана с поддержанием теплового режима установки (поддержание сверхнизких температур) и с соответствующими затратами энергии.

Непростой задачей оказывается и раскрутка твердого тела шаровой формы в криогенном подвесе, потому что традиционные методы разгона с помощью вращающегося магнитного поля здесь оказываются неприменимы.

Открытие высокотемпературной сверхпроводимости, которое явилось значительной сенсацией последнего времени, естественно, усилило интерес и к проблеме магнитной левитации. Однако уже первые эксперименты по использованию высокотемпературных сверхпроводящих керамик дали совершенно неожиданные результаты. Оказалось, что при движении левитирующих тел возникают довольно большие силы так называемого магнитного трения; левитирующее тело обладает не единственными состояниями устойчивого равновесия, причем выбор того или иного состояния равновесия существенно зависит от предыстории движения тела в подвесе. Здесь исследования еще только начинаются, и новые открытия нас ждут впереди.

ЛИТЕРАТУРА

1. Итоги науки и техники. Серия: Современные проблемы математики. М.: ВИНИТИ, 1985. Т. 3.

2. *Козлов В.В.* О степени неустойчивости // Прикладная математики и механика. 1993. Т. 57. В. 5. С. 14 – 24.

3. *Брагинский В.Б.* Физические эксперименты с пробными телами. М.: Наука, 1970. С.76.

4. *Мартыненко Ю.Г.* Движение твердого тела в электрических и магнитных полях. М.: Наука, 1988. С. 368.

* * *

Юрий Григорьевич Мартыненко, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой теоретической механики МЭИ, автор более 100 научных работ.

[1] Из школьного курса физики известно, что тела стремятся занять положение с минимальной потенциальной энергией.